

УДК 591.4: 532.526

ГИДРОБИОНИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ СНИЖЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ

В. В. БАБЕНКО

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 10.01.2000

Исследованы особенности систем организма и их взаимодействие в процессе движения водных животных, направленное на уменьшение энергозатрат. Рассмотрены принципы функционирования гидробионтов, особенности морфологии и физиологии скелета, мышц, кожных покровов, кровеносной системы и иннервации дельфинов с учетом силового воздействия среды обитания на организм. Изучено влияние на системы организма скорости плавания, нестационарности обтекания, нетрадиционного способа создания тяги и специфического строения тела. Приводятся результаты измерения температуры на поверхности тела, распределения упругости, демпфирующих свойств кожи, а также характеристик турбулентного пограничного слоя при различных режимах движения дельфина. Рассмотрена работа систем организма и механизмы регулирования механических свойств кожи в зависимости от скоростей плавания. Выполнено гидродинамическое моделирование систем организма. Приведены результаты экспериментальных исследований некоторых моделей систем организма гидробионтов.

Досліджено особливості систем організму та їх взаємодії в процесі руху водних ссавців, яке спрямовано на зменшення енерговитрат. Розглянуто принципи функціонування гидробионтів, особливості морфології та фізіології кістяка, м'язів, кожних покривів, кровеносної системи та інервації дельфінів з урахуванням силової дії середовища існування на організм. Вивчено вплив на системи організму швидкості руху, нестационарності течії нетрадиційного способу утворення тяги та специфічної будови тіла. Наведено результати виміру температури на поверхні тіла, розподілу пружності, демпфуючих властивостей шкіри, а також характеристик турбулентного граничного шару при різних режимах руху дельфіна. Розглянуто роботу систем організму та механізми регулювання механічних властивостей шкіри в залежності від швидкості руху. Виконано гидродинамічне моделювання систем організму. Наведено результати експериментальних досліджень деяких моделей систем організму гидробионтів.

The singularities of systems of an organism and their interaction are investigated during moving water animals directed on a diminution power inputs. The principles of operation hydrobionts, singularity of morphology and physiology of a skeleton, muscles, skin covers, circulatory system and innervation dolphins with allowance for of force action of a biosphere on an organism are considered. The influence to systems of an organism of a velocity of swimming, non-stationary of a flow, non-traditional mode of creation of a thrust and specific structure of a skew field is investigated. The results of a measurement of temperature on a surface of a skew field, distribution of an elasticity damping properties of a skin, and also performances of a turbulent boundary layer are reduced at various conditions of moving dolphin. The work of systems of an organism and mechanisms of regulating of mechanical properties of a skin depending on velocities of swimming is considered. The hydrodynamic modeling of systems of an organism is carried out. The results of experimental researches of some models of systems of an organism of hydrobionts are reduced.

ВВЕДЕНИЕ

На гидродинамические функции кожных покровов и тел китообразных впервые было обращено внимание в работах [1-6 и др.]. Наибольшее внимание к этим исследованиям привлекла публикация Грея [7], в которой показано, что энергетика дельфинов не соответствует развиваемым ими скоростям плавания. Хертель [8] продемонстрировал различные технические приложения гидробионики, что послужило основанием для развития этого направления в разных странах. Были выполнены фундаментальные теоретические [9 -13] и экспериментальные [14, 15 и др.] исследования по гидробионике.

Известно, что скоростные гидробионты, в частности дельфины, выработали в результате эволюции приспособления для экономного расходования энергии и эффективного снижения сопротивления движению. Гидробионика является новой наукой, основанной на комплексном исследовании рассма-

триваемых явлений на основе привлечения знаний различных научных направлений, включая биологические и технические науки. Как любая новая наука, гидробионика нуждается в разработке методологии и, в частности, новых методик проведения экспериментальных исследований.

В Институте гидромеханики и других институтах НАН Украины, а также в ряде организаций на протяжении тридцати лет проводились исследования гидробионтов. Получены результаты, демонстрирующие уникальные особенности высокоскоростных морских животных и их отличие от обтекания аналогичных жестких тел. В связи с особенностями обтекания тел гидробионтов нельзя проводить гидродинамические исследования живых организмов таким образом, как это делается при исследовании жестких тел в технике. Понимание основных принципов построения организмов является необходимым условием для проведения гидробионических исследований. Изучение систем организма необходимо проводить с учетом

обнаруженных принципов функционирования гидробионтов. Затем необходимо разработать методологию гидробионических исследований и выполнить моделирование отдельных систем в соответствии с законами подобия. Теоретическое и экспериментальное моделирование работы отдельных систем организма или их групп позволяет получить практические рекомендации для реализации закономерностей живой природы. Бионический подход дает возможность разработать более эффективные механические системы. Таким образом, гидробионические исследования необходимо проводить в следующей последовательности:

- изучение принципов функционирования гидробионтов;
- морфологические и физиологические исследования;
- разработка методологии гидробионических исследований;
- моделирование систем организма;
- разработка новых конструкций и технологий.

Цель настоящих исследований заключается в выявлении и изучении механизмов адаптации систем организма гидробионта для экономного расходования энергии при высоких скоростях плавания.

Гипотеза исследований заключается в том, что все системы организма взаимосвязаны и функционируют для достижения максимальной эффективности: снижения сопротивления и повышения КПД движителя.

Формулировка проблемы заключается в определении взаимосвязи между морфологией тела гидробионта и гидродинамикой его обтекания.

Подход состоит в описании морфологических особенностей систем гидробионтов, включая гидродинамическое соответствие и взаимодействие систем организма.

Ниже будут приведены результаты исследований, выполненные в соответствии с выбранным подходом. Подробные иллюстрации к приведенным материалам даны в [9, 21, 27].

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ГИДРОБИОНИКИ

Необходимым условием для понимания особенностей строения гидробионтов и их систем, а также для моделирования этих особенностей в технике является изучение и систематизация принципов гидробионики. К настоящему времени изучено более 34 принципов: Е. В. Цербст рассмотрел 3 принципа [16], Р. Райнер – 6 [17], В. Нахтигаль –

10 [18], С. В. Першин – 8 [19-21], Бабенко В. В – 10 [22-27]. Приведем некоторые из принципов гидробионики, необходимые для понимания отличительных особенностей живых организмов по сравнению с классической гидродинамикой жесткого тела. С. В. Першин изучил следующие принципы:

- *Принцип уравновешенности силы плавучести.* Средняя плотность тела гидробионтов близка к плотности воды, поэтому положительная или отрицательная плавучесть нейтрализуется при движении гидродинамической равнодействующей силой корпуса и плавников.
- *Биологический принцип конвергенции* (сходство признаков) утверждает, что в устойчиво однородных условиях обитания животные разных видов под действием естественного отбора сближаются по некоторым признакам, непосредственно связанным с воздействием внешней среды.
- *Биологический принцип дивергенции* (расхождение признаков) означает, что в пределах одного вида нет совершенно одинаковых организмов. Первоначально однородные группы их в процессе естественного отбора в нескольких отличных условиях специализировались в разных направлениях. В результате появились разновидности и новые виды с более выраженными различиями в строении, функциях и образе жизни.
- *Биологический принцип эмбриогенеза.* В процессе развития зародышей общие признаки большой группы животных обнаруживаются раньше, чем специальные. Поэтому у эмбриона появляются последовательно различные признаки, вызванные исторически воздействием среды обитания.
- *Принцип прогрессивного плавания* заключается в том, что с увеличением размеров гидробионтов и повышением уровня организации существенно растет максимальная скорость плавания. Это обусловлено тем, что эффективная мощность гидробионтов пропорциональна кубу линейных размеров (массе), а гидродинамическое сопротивление – квадрату линейных размеров (площади смоченной поверхности).
- *Принцип циклического движения.* Движение водных животных всегда нестационарное, обычно периодическое, квазигармоническое. Кроме того, активное плавание чередуется с движением по инерции. Этот принцип можно объяснить биологическими свойствами регулирования параметров живых тканей, обусловленными циклами энергообмена, актами

дыхания и кровообращения, а также нестационарностью плавания.

- *Принцип унификации движителя.* Гидробионты движутся с помощью упругих изгибно-колебательных комплексов различной структуры, которые при увеличении размеров и скоростей плавания гидробионтов локализуются в хвостовой части тела.
- *Принцип относительного гидродинамического соответствия* характеризуется тем, что с ростом числа Рейнольдса последовательно локализуются области гидробионтов с закономерно изменяющимися характеристиками движителей и способов плавания в соответствии с гидродинамическими режимами течения в пограничных слоях и вихревых следах. Однако характерные числа Рейнольдса существенно отличаются от таковых для твердых тел за счет специфических гибких кожных покровов и нестационарности обтекания.

Приведем принципы, разработанные В. В. Бабенко [22-27] :

- *Основной принцип живых организмов.* В процессе эволюции все живые организмы выработали свойство минимальных затрат энергии для обеспечения процесса жизнедеятельности.
- *Принцип рецепторной регуляции.* При движении в жидкости твердого тела на его поверхность действуют различные гидродинамические силы. Но твердое тело не чувствительно к этим силам, потому что дизайнеры заранее устанавливают такой запас прочности, чтобы тело не деформировалось. У всех гидробионтов и, в частности, у китообразных нервные окончания располагаются в коже очень близко к обтекаемой поверхности – на расстоянии до нескольких десятков микрон от поверхности тела. Расчеты показали, что пульсации давления и скорости пограничного слоя такими рецепторами чувствуются очень хорошо. Так как поверхность иннервирована, то силовое воздействие гидродинамического поля внешней среды и особенно градиенты гидродинамических нагрузок чувствительно воспринимаются живым организмом. Любое вихревое возмущение животное чувствует. Этот принцип означает, что в результате эволюции организм гидробионта отработал приспособления, направленные на устранение болевых ощущений, вызываемых пульсационными полями окружающей среды.

- *Принцип взаимосвязанности* заключается в том, что все системы в живом организме действуют взаимосвязано.
- *Принцип полифункциональности* означает, что большинство систем организма имеет не одну функцию, а несколько.
- *Принцип комбинированных адаптивных систем* заключается в том, что для достижения наибольшей эффективности работает не одна система, а несколько.
- *Принцип автоматического регулирования* состоит в том, что все приспособления в организме регулируются автоматически.
- *Принцип терморегуляции* заключается в том, что у гидробионтов существуют механизмы для регулирования теплового потока и, кроме того, разогрев тела при колебательном движении направлен не на организацию теплового пограничного слоя, а, например, на регулирование механических характеристик колеблющегося тела и кожных покровов, необходимых для эффективного управления когерентными вихревыми структурами пограничного слоя.
- *Принцип взаимодействия с физическими полями среды обитания.* В результате эволюции в организме выработаны приспособления, направленные на взаимодействие систем организма с физическими полями среды обитания: силовым, термодинамическим, гидродинамическим, электрическим, геомагнитным и др.
- *Принцип единства двигательного-движительного комплекса.* Двигатель и движитель в организме функционируют взаимосвязано как одно целое и способствуют автоматическому регулированию и настройке как движителя, так и способов уменьшения сопротивления движению.
- *Принцип единства одновременного функционирования всех принципов.* Чем выше организация животного, тем большее число рассмотренных принципов одновременно функционирует в организме.

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕЛА

В соответствии с гипотезой настоящих исследований вначале рассмотрим геометрические параметры тела и его частей (плавников). На рис. 1 (кривая I) сверху показан ламинаризованный профиль серии "В" ЦАГИ. На таком профиле пограничный слой остается ламинарным на протяжении 80% ÷ 90% смоченной поверхности, т. е. такой профиль имеет минимальное сопротивление трения и минимальную толщину пограничного слоя и

следа за профилем. Кривыми II–VIII представлены формы тела некоторых китообразных. Видно, что все тела имеют ламинаризованную форму. Причем геометрия профиля тела такова, что результирующая подъемная сила профиля тела у одних китообразных направлена вверх (кривые II–IV), а у других вниз (кривые V–VIII) [28]. Это связано с образом жизни китообразных. В отличие от твердых тел, китообразные могут регулировать форму тела и менять направление результирующей силы. Кроме того, тело китообразных имеет почти нулевую плавучесть, поэтому они могут перемещаться в жидкости при различном положении тела. Это способствует эффективной маневренности тела.

Форма плавников китообразных также имеет оптимальную геометрию, соответствующую лучшим аэродинамическим профилям. Плавники китообразных имеют возможность изменять свою геометрию, а хвостовой плавник изменяет размах и форму профиля циклически в процессе колебания [29].

На рис. 2 приведены обобщенные зависимости длины тела и площади хвостового плавника в зависимости от массы и длины тела водных животных и птиц [26]. Зависимость длины тела от массы характеризует отношение сопротивления тела от его энергетических возможностей (от мощности). Известно, что сопротивление пропорционально квадрату длины, а мощность – кубу длины. Приведенные на рис. 2 зависимости свидетельствуют об оптимальных соотношениях геометрических и энергетических параметров тела гидробионтов.

СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ

Для того, чтобы оценить соответствие приспособлений систем организма гидродинамическим закономерностям обтекания тела, необходимо знать реальные скорости плавания гидробионтов. Различают три характерные скорости плавания: медленное плавание при неограниченном времени перемещения, крейсерские скорости плавания, которые животные могут выдерживать в течение 15 ÷ 20 мин., и форсированные скорости, которые животные могут поддерживать в течение нескольких секунд.

В [9, 21] представлена зависимость крейсерского режима движения от продолжительности плавания для гидробионтов, движущихся в природе, и рыб при проведении исследований в гидродинамических трубах, а также при исследовании плавания спортсменов. Показано, что при увеличении

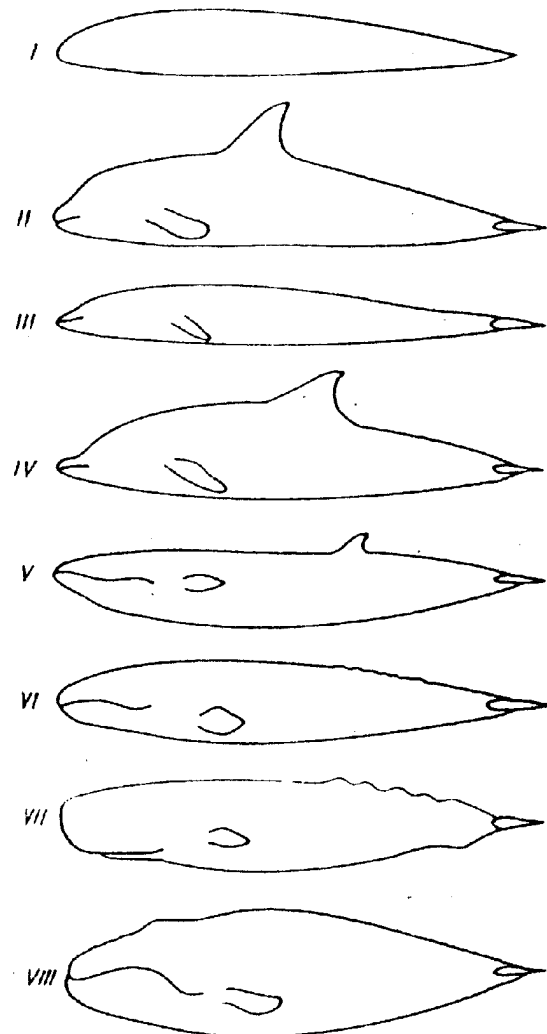


Рис. 1. Формы профиля серии В ЦАГИ и некоторых видов китообразных:

I – профиль крыла, II – касатка, III – китообразный дельфин, IV – дельфин белобочка, V – сейвал, VI – серый кит, VII – кашалот, VIII – гладкий кит

времени выдерживания нагрузки скорость плавания уменьшается. Таким образом, скорость движения определяется временем выдерживания нагрузки. Кроме того, скорость движения определяется величиной мускулатуры, т. е. размерами или длиной животного (рис. 2).

В [9, 21] представлено сравнение гидродинамических параметров различных гидробионтов и технических объектов, ходовые испытания которых выполнены в лабораторных и натуральных условиях. Большинство быстро плавающих гидробионтов не уступают по отдельным параметрам техническим средствам перемещения в жидкости.

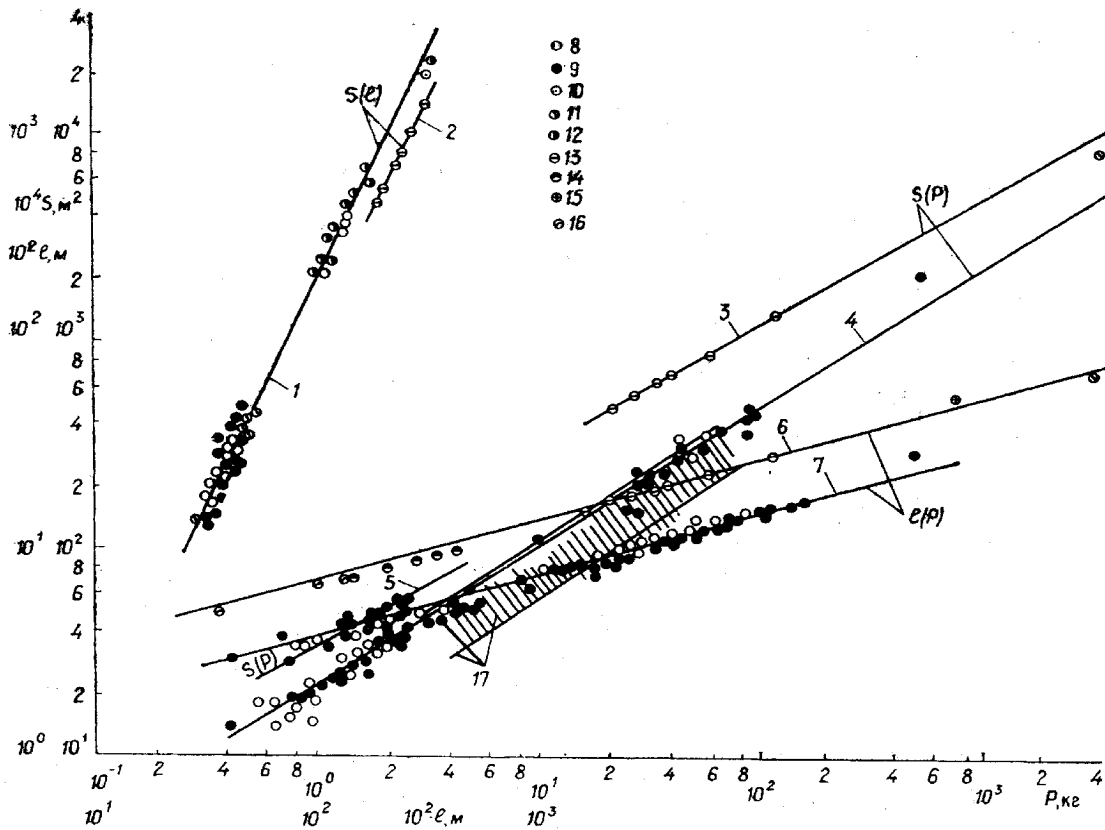


Рис. 2. Зависимости площади хвостового плавника от длины (1, 2) и массы (3, 4, 5) тела гидробионтов, а также зависимости их длины от массы (6, 7): у пелагиды (8), различных тунцов (скумбриевидного, желтоперого, макрелевого, полосатого, длинноперого, пятнистого, большеглазого) (9), у акул: песчаной (10), сельдевой (белой) (11), мако (12), голубой (13), кунья (14), шестижаберной акулы (15), катрана (16). Зависимость площади крыльев от массы птиц (17) [Лайтхилл]

При этом энерговооруженность гидробионтов существенно меньше технических объектов.

ЭНЕРГЕТИКА

Наличие ламинаризованной формы тела гидробионтов не объясняет зафиксированные скорости их плавания. Можно предположить, что существует комплекс приспособлений в строении организма для достижения наблюдаемых скоростей плавания. Была высказана гипотеза, что определяющим является энергетика животных. Были выполнены измерения энерговооруженности некоторых видов скоростных гидробионтов. В [9, 21] приведены мощность основного и активного обмена в зависимости от общей массы собаки, человека, лошади и дельфинов морская свинья и афалина. Определено, что закономерности для теплокровных животных одинаковы. Чем больше масса, тем больше развиваемая мощность. Там же получена зависимость максимальной удельной отдачи мощ-

ности, затрачиваемой на внешнюю механическую работу, от продолжительности плавания. Получена эмпирическая зависимость:

$$Q_{max} = 1.73[\ln(1 + T)]^{-1.25},$$

где T – время выдерживания нагрузки, с; Q_{max} – развиваемая при этом мощность, Вт/н.

Существует несколько методов определения энерговооруженности гидробионтов. Один из них состоит в анализе газового состава выдыхаемого воздуха в зависимости от выполняемой нагрузки. Второй метод состоит в оценке высоты прыжка и кинематики движения во время прыжка. Все измерения показали, что энерговооруженность быстро плавающих гидробионтов сравнима с энергией хорошо тренированных спортсменов, в частности, олимпийских чемпионов. Феноменальных отличий энерговооруженности быстро плавающих гидробионтов от человека не обнаружено. Известно, что в тканях китообразных имеется миоглобин, который способствует накоплению и резерви-

рованию кислорода. Миоглобин способствует глубоководному нырянию и форсированию скорости, но не оказывает существенного влияния на величину крейсерской скорости и энерговооруженности. Поэтому форма тела и энерговооруженность не позволяют объяснить высоких скоростей плавания гидробионтов. Следовательно, у гидробионтов должны быть также другие приспособления для быстрого плавания. Существует комплекс взаимодействующих приспособлений для экономного расходования энергии [30].

НЕСТАЦИОНАРНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

Все гидробионты двигаются нестационарно и обтекаются нестационарным потоком. Различают три способа плавания гидробионтов [9]: угревидный, скомброидный, когда колеблется хвостовая часть тел, и кузовковый. В [9, 21, 31] показана типичная траектория хвостового плавника при скомброидном способе перемещения, при этом центр тяжести движется по прямолинейной траектории. Выполнен большой объем экспериментальных исследований кинематики плавания рыб и дельфинов [21, 31]. Разработаны теории движения гидробионтов, позволяющие вычислить их гидродинамические характеристики [9-13]. В расчетах вводится подсасывающая сила, возникающая в хвостовой части тела гидробионтов. Измерения распределения давления вдоль тела показали [9, 11], что при активном плавании происходит перераспределение давления вдоль тела, способствующее ламинаризации пограничного слоя. Однако расчеты показали, что и в этом случае подсасывающая сила и перераспределение давления не позволяют объяснить феномен быстрого плавания гидробионтов.

В [9] приведены закономерности распределения кинематических параметров нестационарного пограничного слоя на теле дельфинов. С помощью термоанемометра были выполнены прямые измерения продольной пульсационной составляющей скорости в пограничном слое дельфина при различных режимах его движения [32-34]. Сравнение распределения продольной пульсационной скорости вдоль тела живого дельфина и вдоль жесткого тела вращения показало, что переход к турбулентности вдоль тела дельфина происходит при большей скорости движения. Максимум распределения пульсационной скорости по длине у гидробионтов меньше, чем у жесткого тела, а указанная закономерность имеет более гладкий характер, нет больших градиентов изменения пульсационной скорости, как это было измерено при обтекании жестко-

го тела. Показано, что в зависимости от режима ускорения при плавании дельфинов величина пульсаций и их закономерности вдоль тела существенно меняются. Обнаружено также, что распределение пульсационной скорости вдоль тела дельфина и его жесткой копии. Видно существенное различие пульсаций скорости в пограничном слое дельфина и его жесткой модели. При активном плавании пульсации пограничного слоя существенно меньше [32-34]. Величина пульсаций определяет сопротивление трения. Таким образом, по этим данным видно, что сопротивление трения активно движущегося дельфина существенно меньше, чем у жесткого тела. Для понимания этих различий рассмотрим морфологическое строение кожи дельфина и его систем.

МОРФОЛОГИЯ СИСТЕМ ОРГАНИЗМА

В [1-3] приведено классическое строение кожи дельфина по академику В. Е. Соколову. Очень хорошо видны в наружных слоях кожи дермальные сосочки и дермальные валики. В [22] показана схема строения кожи по Суркиной и Бабенко. Основное отличие от схемы Соколова – это наличие кожной мускулатуры и специфические особенности строения наружных слоев, которые приводятся в [35-37].

В [21] приведено развитие кожи в онтогенезе, показывающее, что по мере развития эмбриона в его организме появляются признаки, которые выработаны при многовековом отборе. Наличие дермальных сосочков и валиков появилось в сравнительно недавнее время. Миллионы лет назад кожа дельфинов была такая же, как и у человека. Упорядоченность в продольном направлении в коже появилось под действием напряжения трения обтекающего потока и направлено на снижение сопротивления.

В [22, 27] приведены размеры поперечных микроскладок на поверхности кожи и углы наклона дермальных сосочков по отношению к поверхности тела в различных местах вдоль тела. Приведена также топография углов наклона сосочков вдоль тела дельфина. Видно, что эти углы наклона коррелируются с градиентами гидродинамических нагрузок на теле, возникающих при движении в водной среде. Углы наклона вдоль тела существенно изменяются и определяются только гидродинамикой обтекания тела.

В [1-3, 27, 36, 38] показано направление вдоль тела дермальных валиков в коже дельфина. Известно, что дермальные сосочки располагаются рядами вдоль продольных дермальных валиков. Такое

расположение как бы соответствует линиям тока в пограничном слое при обтекании тела дельфина.

В [27, 35, 37] представлено расположение кожной мышцы вдоль тела дельфинов афалина и азовка. Кожная мышца играет важную роль при регулировании механических свойств кожи. Представлена также общая схема расположения двигательной мускулатуры и кожной мышцы вдоль тела дельфина.

Было измерено распределение вдоль тела толщины кожи в целом и отдельных ее слоев [37]. Поверхностный тонкий слой имеет равномерную толщину вдоль тела. Более глубокие слои имеют разную толщину вдоль тела, что связано с ее гидродинамическими функциями.

В [27, 38-40] представлена общая схема кровеносной системы и иннервации тела дельфина, а также типичная картина переплетения кровеносной и лимфатической систем в кожном покрове млекопитающих. В районе каждого позвонка существует автономная кровеносная, лимфатическая и иннервационная периферические системы, ответвляющиеся от центральных магистральных систем и охватывающие области узких кольцевых участков кожи. Обнаруженное специфическое строение систем организма дельфинов проиллюстрировано в [27].

ИЗМЕРЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОЖИ ДЕЛЬФИНА

У дельфинов имеются определенные морфологические приспособления, направленные в первую очередь, на интенсивное поперечное кровоснабжение кожных покровов. Автономная поперечная иннервация кожи свидетельствует о быстром регулировании кровеносной и лимфатической систем. Как следует из данных, приведенных в [9, 20-22, 26, 27, 41, 42], кожные покровы в результате длительной эволюции выработали приспособления для уменьшения силового воздействия окружающей среды.

В связи с этим представляет интерес измерение механических характеристик кожных покровов. На основании анализа строения кожи была разработана механическая модель элемента кожного покрова (рис. 3) [43, 44]. Для этой модели составлено дифференциальное уравнение движения:

$$(T_1 + T_2) \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} - (M_1 - M_2) \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial t^2} - \eta \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial t} - (E'_1 + E'_2 + E'_3) \varepsilon_y = P - \sigma,$$

где T_n – величина натяжения в соответствующем слое; M – колеблющаяся масса; η – вязкость или

демпфирование слоев кожи; E – модуль упругости; P – сила, действующая на поверхность кожи; σ – реакция поверхности на действие этой силы, определяемое величиной присоединенной массы; ε_y – упругая деформация в вертикальном направлении; x – продольная координата; t – время.

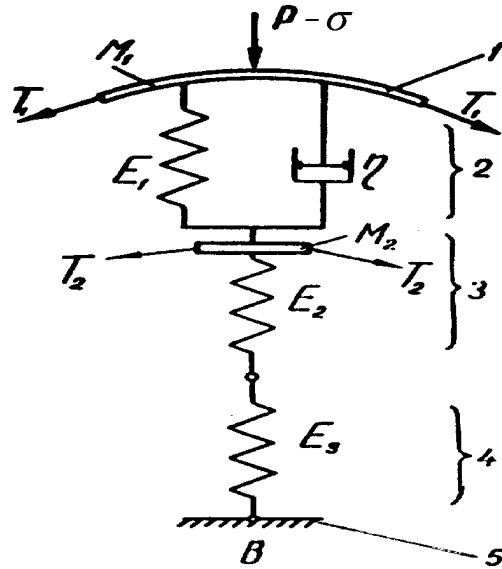


Рис. 3. Механические модели мембранной (1, 2) и композитной (1-4) эластичных поверхностей: 1 – наружная мембрана, 2 – расположенный под ней эластомер, 3 – второй слой внутреннего натяжения, 4 – эластичная подложка, 5 – основание

Обезразмеривание коэффициентов этого уравнения позволило определить основные критерии подобия [27, 43, 45]:

$$k_M = \frac{Re_1}{\rho} M_\Sigma, \quad k_T = \frac{T_\Sigma}{\mu U_\infty},$$

$$k_E = \frac{E'_\Sigma}{\mu U_\infty Re_1^2}, \quad k_\omega = \left(\frac{E'_\Sigma}{M_\Sigma} \right)^{1/2} \frac{1}{U_\infty Re_1},$$

$$k_\eta = 2\zeta = \frac{\Delta}{\pi}, \quad Re_1 = \frac{U_\infty}{\nu}, \text{ м},$$

$$C_m = \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2}, \text{ м/сек}, \quad c_{0m} = \frac{C_m}{U_\infty},$$

где, k_M – параметр колеблющейся массы; k_T – параметр натяжения; k_E – параметр упругости; k_ω – параметр предельной частоты колебания; k_η – параметр демпфирования; Re_1 – единичное число Рейнольдса, C_m – фазовая скорость колебания кожи, c_{0m} – скорость основного течения; ν – коэффициент кинематической вязкости; μ – коэффициент

вязкости; ρ – плотность жидкости; M – колеблющаяся масса; T_n – натяжения; E – модуль упругости; Δ – логарифмический декремент затухания.

Были разработаны приборы и методики для определения механических характеристик кожных покровов дельфинов [23, 45, 46]. С помощью специально изготовленного прибора проведены измерения упругости кожи вдоль тела. Получены результаты измерения распределения упругости кожи вдоль тела для быстро плавающих (белобочка, афалина) и медленно плавающих (азовка) тренированных и только что отловленных дельфинов. В средней части тела упругость уменьшается, а в хвостовой части – возрастает.

Важной характеристикой является жесткость, определяемая отношением упругости к толщине измеряемого материала:

$$S = \frac{E}{t'}$$

На рис. 4 приведены результаты измерения жесткости кожных покровов указанных дельфинов. Вверху приведены данные для средних скоростей плавания (для белобочки $U_\infty = 6$ м/с и для афалины – 6.9 м/с), а внизу для крейсерских скоростей плавания (для белобочки – 7.8 м/с и для афалины – 9 м/с). Сплошными линиями обозначены результаты расчетов, а штриховыми – аппроксимации этих расчетов формулами

для верхних кривых:

$$1 - S \cdot 10^{-7} = 67 \frac{x}{L} \left(\frac{x}{L} - 0.96 \right) + 23;$$

$$2 - S \cdot 10^{-7} = 48.7 \frac{x}{L} \left(\frac{x}{L} - 0.94 \right) + 17.5;$$

для нижних кривых [43]:

$$1 - S \cdot 10^{-7} = 49.4 \frac{x}{L} \left(\frac{x}{L} - 0.84 \right) + 10.5;$$

$$2 - S \cdot 10^{-7} = 53 \frac{x}{L} \left(\frac{x}{L} - 0.84 \right) + 10.$$

Здесь L – длина тела.

Одним из критериев является параметр жесткости:

$$k_s = S \frac{\nu}{\rho} \frac{1}{U^3}.$$

Измерение параметра жесткости показало, что при плавании со средними скоростями величина этого параметра имеет неоптимальные значения, а при плавании с крейсерскими скоростями в большей части тела параметр имеет оптимальные значения.

На рис. 5 приведены результаты измерения поглощающих свойств кожи дельфина, определяемых

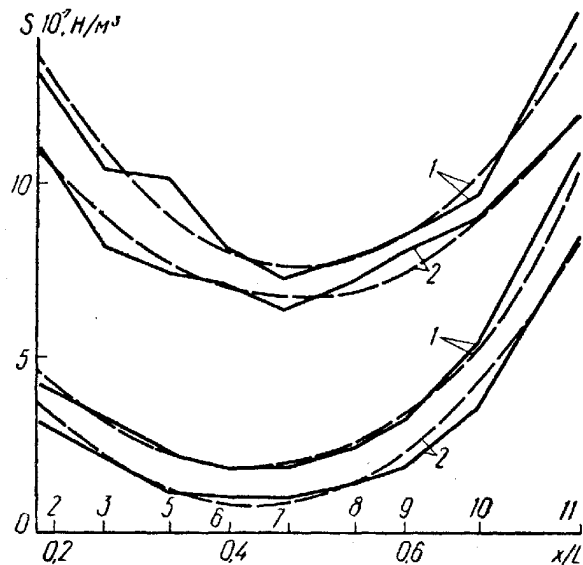


Рис. 4. Распределение жесткости кожных покровов дельфинов белобочка (1) и афалина (2) при различных скоростях плавания

по высоте отскока h металлических шариков разных масс m от кожи дельфинов по отношению к начальной высоте падения шариков h_0 . По оси ординат отложена величина коэффициента демпфирования:

$$K = \left(1 - \frac{h}{h_0} \right) \cdot 100,$$

а по оси абсцисс – потенциальная энергия возмущения (падающих шариков), действующего на кожу дельфина:

$$\Pi = mgh_0.$$

Видно, что зависимости коэффициента демпфирования для кожи живых дельфинов существенно отличаются от таких характеристик для кожи больного или только что умершего дельфина, а также от эластомеров и конструкционных материалов. Главное отличие состоит в том, что коэффициент поглощения кожи живых дельфинов приближается к 100% при значении энергии возмущения, соответствующей энергии пульсаций давления турбулентного или переходного пограничных слоев [27, 47].

Были исследованы также другие механические параметры кожных покровов: колеблющаяся масса, коэффициент натяжения кожи, фазовая скорость колебания кожи. Все эти параметры становились оптимальными для снижения сопротивления трения только при больших скоростях плавания.

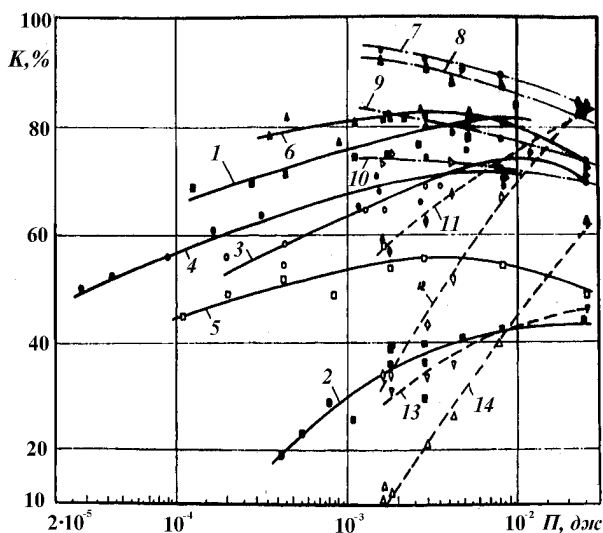


Рис. 5. Зависимость коэффициента демпфирования от энергии возмущения (потенциальной энергии падающих шариков): 1-6 – эластичные материалы; 7, 8 – здоровые; 9 – больной; 10 – только что умерший дельфины; 11 – незакрепленная стальная полоса; 12 – силикатное стекло; 13 – деревянная пластина; 14 – оргстекло

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Энергии организма достаточно при плавания с малыми скоростями. При движении на крейсерских скоростях энергии недостаточно, и в работу должны включаться приспособления для уменьшения сопротивления трения, выработанные при эволюционном развитии. В частности, существенную роль при этом играет форма тела и плавников, а также специфическое строение кожных покровов. Механические характеристики кожных покровов становятся оптимальными с гидродинамических позиций только при больших скоростях плавания. При плавании с максимальными скоростями должны включаться в работу такие приспособления организма, когда взаимосвязано действуют все системы организма.

На рис. 6 представлена схема поперечного распределения систем организма и их взаимосвязь. Видно, что в районе каждого позвонка вертикально вверх направлены кровеносные, лимфатические сосуды и нервные стволы. Это позволяет кратчайшим путем обеспечить поступление крови и автоматически поперечно (вдоль каждой секции позвонка) регулировать кровоток в наружных слоях кожи. На рисунке видны также два слоя, насыщенные горизонтальными слоями кровеносных систем. Слой кожной мышцы

может регулировать механические свойства слоев кожи, расположенной выше этого мышечного слоя, а напряжение двигательной мускулатуры циклически, в такт с работой движителя, изменяют тургор (напряжение) всей кожи.

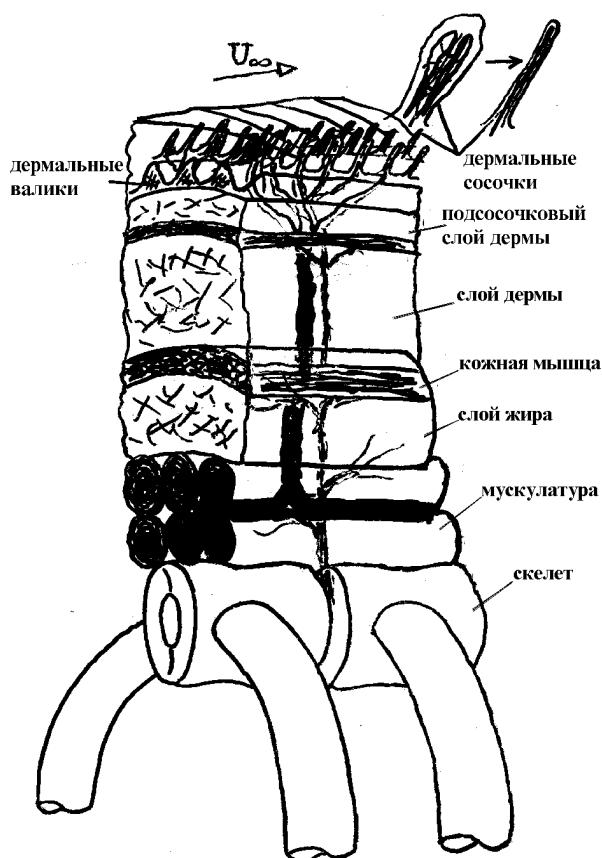


Рис. 6. Схема поперечного вдоль тела расположения кровеносной, лимфатической и иннервационной систем организма китообразных

На основе анализа взаимодействия систем организма и рис. 6 разработана классификация методов взаимодействия биологических систем. В результате такого взаимодействия происходит:

1. Управление формой тела и плавников.
2. Управление геометрическими параметрами кожных покровов.
3. Адаптация механических характеристик кожи с помощью натяжения кожи мышцами и колебания эластичной среды (кожи).
4. Регулирование механических характеристик кожи с помощью системы кровообращения и иннервации.

5. Специфическое регулирование температуры тела и кожи.
6. Оптимизация механических параметров кожи.
7. Регулирование вибраций на поверхности кожи.

В [44] показано, как происходит регулирование формой тела. В [21, 38] приведено строение скелета дельфина и расположение вдоль тела двигательной мускулатуры, при этом хорошо видно соответствие этих систем. При напряжении двигательной мускулатуры объем, поперечное сечение и форма тела могут изменяться за счет большой подвижности и специфического строения скелета и легких, наполненных воздухом. В [9, 21] показано, как изменяется форма вертикального и горизонтальных плавников. Такое изменение происходит за счет специфических комплексных сосудов и регулирования их кровенаполнения [4, 20, 21]. В [44] показано, как за счет специфического строения кожной мышцы изменяется толщина и форма кожных покровов. При этом вдоль тела при быстром плавании образуется продольная складка. Расчеты показали, что за счет незначительного изменения диаметра тела и толщины кожного покрова могут существенно изменяться механические характеристики кожи, стабилизирующие пограничный слой.

В [23] показано, как за счет изменения натяжения в коже с помощью кожной мышцы регулируется упругость кожных покровов. Существует функциональная связь скелета дельфина и его подвижных ребер с двигательной мускулатурой, кожной мышцей и всей кожей, включая кровеносную и лимфатическую системы и иннервацию. При колебательной работе движителя подвижность тела обеспечивается специфическим строением скелета. При этом включается в работу кожная мышца и мембранные тяжи в коже так, что по поверхности тела пробегает пропульсивная волна. Происходит взаимодействие кожи с вихревыми структурами пограничного слоя. При изменении режима движения изменяется частота колебания хвостового движителя. Двигательная мускулатура связана сухожильными тяжами с кожной мышцей, которая соединена мембранами со всеми слоями кожи. При изменении частоты колебания изменяется напряжение кожи и диаметр всего тела, что сказывается на сопротивлении тела. Таким образом, кроме прямых функций создания упора двигательная мускулатура влияет на снижение сопротивления и маневренность. Дельфин представляет собой в процессе движения упругую колеблющуюся балку. Поверхность кожи можно представить в

виде конических упругих оболочек. За счет специфического строения кожи и подкожной жировой клетчатки осуществляется теплоизоляция тела от окружающей водной среды. Вследствие этого при плавании с большой скоростью происходит разогрев тела и кожи вследствие колебания упругих систем. Известно, что упругие свойства эластичных материалов существенно зависят от температуры. Таким образом, осуществляется адаптация механических характеристик кожи к внешним гидродинамическим нагрузкам.

В [41, 46] представлена схема распределения гидродинамических нагрузок, действующих на тело вращения, похожего по форме с телом дельфина. Приведено распределение вдоль тела касательного напряжения, действующего на поверхность кожи; распределения статического давления; толщины вытеснения ламинарного пограничного слоя. Видно, что в определенных местах тела градиенты гидродинамических нагрузок будут различными. В соответствии с этим регулирование механических характеристик кожных покровов должно быть посекционным и в соответствии с указанными распределениями нагрузок. В [21] представлена зависимость длины секции саморегулирования демпфирования кожи китообразных от относительной максимальной скорости плавания и числа Рейнольдса.

У теплокровных китообразных регулировка упругих свойств кожи осуществляется также с помощью систем кровообращения и иннервации. В [25, 40] приведена схема кровообращения в коже дельфинов. Показано, что существуют два слоя горизонтально расположенных сосудов. В сочетании с кожной мышцей это позволяет создавать тепловую завесу и эффективно управлять тепловым режимом тела и кожных покровов. В подсосочковом слое обнаружены комплексные сосуды, позволяющие эффективно регулировать теплообмен. В эпидермисе капилляры венул и артериол имеют между собой прямые перемишки, что позволяет эффективно перетекать крови из артериальной системы в венозную. Благодаря специфической системе иннервации это перетекание может активно регулироваться. За счет управления кожной мышцей сосуды могут пережиматься или полностью открываться. Таким образом, тепловой поток с помощью кровеносной системы может, с одной стороны, закольцовываться внутри тела, а с другой стороны, направляться в наружные слои кожи для изменения ее механических характеристик. В [25] приведен расчет удельного теплового потока через единицу длины кожи дельфина белобочки и афалины. В основу рас-

четов положены измерения температуры наружной поверхности кожи, выполненные на различных видах живых дельфинов [25]. Измерения показали, что в спокойном состоянии при медленном плавании температура поверхности кожи незначительно отличается от температуры среды: перепад температуры составляет $0.5 \div 0.7^\circ\text{C}$. На плавниках перепад увеличивается до нескольких градусов. При такой разности температур тепловой пограничный слой не имеет значения для стабилизации пограничного слоя. При больших скоростях плавания кровоток увеличивается, возрастает парциальное давление в капиллярах дермальных сосочков, которые приобретают грушевидную форму [22]. При этом, с одной стороны, увеличивается упругость кожи, но, с другой стороны, за счет специфической формы сосочков возрастают ее демпфирующие свойства. Тем самым происходит настройка стабилизирующих свойств кожи на оптимальный режим.

Сосуды лимфатической системы имеют специфические клапаны для течения лимфы в одну сторону. Лимфатическая система участвует также в формировании оптимальных механических свойств кожных покровов.

Для определения оптимальных механических свойств кожных покровов были выполнены теоретические и экспериментальные исследования с аналогами кожных покровов дельфинов. Определен диапазон оптимальных параметров механических характеристик пассивных аналогов кожных покровов. Эти значения сравниваются с результатами измерения механических характеристик кожных покровов и могут быть, в первом приближении, ориентирами для определения соответствующих характеристик искусственных эластичных покрытий.

Были выполнены также прямые измерения вибраций кожных покровов при различных скоростях плавания [21, 48, 49]. Выполненные расчеты механических характеристик на основании результатов этих измерений показали хорошее соответствие с приведенными на рис. 4, 5 данными. Кроме того, активное колебание наружных покровов свидетельствует о резонансном механизме взаимодействия с возмущениями пограничного слоя [19, 21].

В [50, 51] приведены другие примеры взаимодействия систем организма, направленные на экономное расходование энергии. Важно подчеркнуть, что взаимодействие систем организма выработано под действием силового поля окружающей среды в результате эволюционного развития и направлено на взаимодействие со средой обтекания.

НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ ОРГАНИЗМА

В [16, 24, 46] подробно изложены основы закономерностей моделирования при проведении гидробионических исследований. На основе анализа приведенных выше особенностей функционирования гидробионтов и закономерностей взаимодействия их систем выполнено теоретическое и экспериментальное моделирование некоторых систем организма. Выше указаны работы, в которых выполнено теоретическое моделирование некоторых особенностей гидробионтов. В частности, разработаны теоретические модели движения гидробионтов, функционирования их плавниковых и гидрореактивных движителей, а также работы кожных покровов, снижающих сопротивление трения. Ниже приведем некоторые примеры экспериментального моделирования систем организма гидробионтов.

На рис. 7 показана общая картина развития когерентных вихревых структур в пограничном слое плоской жесткой пластины при ламинарном, переходном и турбулентном режимах течения. Внизу показана общая схема морфологического строения наружных слоев кожи дельфина и формирование в пограничном слое с помощью кожи двух видов когерентных структур: синусоидальной волны и продольных вихрей.

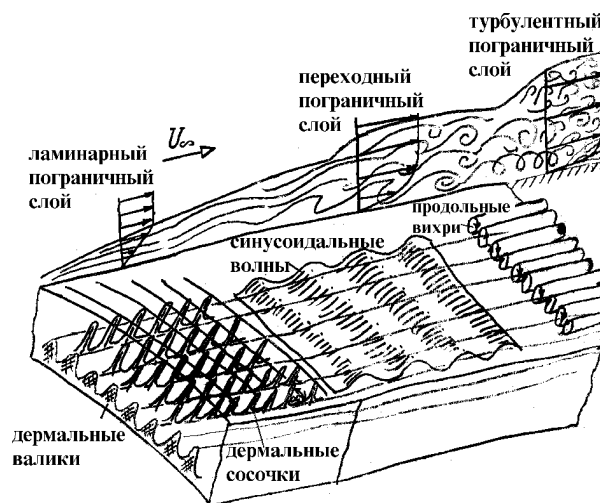


Рис. 7. Схема формирования в пограничном слое с помощью кожи двух видов когерентных структур: синусоидальной волны и продольных вихрей

До настоящего времени выполнены многочисленные экспериментальные исследования пограничного слоя при обтекании жесткой поверхности при различных условиях. На основании приведенных выше данных становится очевидным, что ха-

рактические пограничного слоя при обтекании эластичных поверхностей гидробионтов будут существенно отличными от аналогичных при обтекании жесткой поверхности. Кроме того, ясно, что гидробионты управляют характеристиками пограничного слоя с целью уменьшения болевого воздействия на тело, при этом автоматически уменьшается сопротивление трения. Однако не было проведено никаких экспериментальных исследований в соответствии с указанными гипотезами.

На основе современных представлений о структуре пограничного слоя и приведенной на рис. 7 картине взаимодействия кожи с пограничным слоем были выполнены систематические исследования пограничного слоя на аналогах кожных покровов гидробионтов [46, 52, 53]. Для этого разработаны различные модели кожных покровов гидробионтов, на которых выполнены классические экспериментальные исследования гидродинамической и гертлеровской устойчивостей. Изучены закономерности развития возмущающего движения на различных этапах перехода, а также кинематические параметры турбулентного пограничного слоя. Была выдвинута гипотеза, что в результате взаимодействия кожных покровов с потоком в соответствии с принципом рецепторной чувствительности выработаны механизмы автоматического управления потоком кожными покровами. Другими словами, гидробионты выработали механизмы автоматического управления когерентными вихревыми структурами пограничного слоя. Для понимания этих механизмов была предложена гипотеза взаимодействия возмущений в пограничном слое с целью уменьшения сопротивления трения. В соответствии с предложенным методом взаимодействия вихревых структур в пограничном слое выполнены систематические экспериментальные исследования восприимчивости пограничного слоя к различным возмущениям на различных этапах перехода, включая и турбулентный режим течения. Все эксперименты проведены при обтекании жесткой и различных видов эластичных поверхностей, в той или иной мере моделирующих работу кожных покровов гидробионтов. Полученные результаты обобщены в трех монографиях [46, 52, 53]. Основные результаты состоят в следующем. Чем больше особенностей строения кожных покровов гидробионтов учтено при моделировании, тем большие различия получены по сравнению с обтеканием жесткой поверхности. При этом обнаружены существенные различия в механизмах формирования и структуре возмущающего движения на всех этапах развития

пограничного слоя. Эти различия наблюдаются по всей толщине пограничного слоя. Результаты получены с помощью методов визуализации и термо-и лазерной анемометрии. Полученные результаты доказывают существование неизвестных ранее феноменов живой природы.

Выполнены также модельные эксперименты, в которых изучены механизмы инъекции в пограничный слой растворов полимеров, роль мечевидных наконечников, функционирование плавниковых движителей, роль формы тела различных гидробионтов и др.

РАЗРАБОТКА НОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ТЕХНОЛОГИЙ

Известно, что достаточно сложно выполнить полное моделирование живой природы. В модельном эксперименте при частичном моделировании важно исследовать физические закономерности различных явлений живой природы. Для реализации обнаруженных явлений необходимо получить с достаточной достоверностью интегральные результаты исследуемого явления. Так, в [9, 31] выполнены измерения кинематики плавания живых дельфинов. По результатам обработки кинограмм и прямых обмеров тела и плавников дельфина были вычислены параметры, по которым построены зависимости коэффициента сопротивления дельфина от числа Рейнольдса при движении с различными ускорениями и по инерции с неработающим движителем [54]. Коэффициенты гидродинамического сопротивления дельфина, полученные с помощью квазистационарного подхода, при работе движителя в режиме машущего крыла считаются во всех случаях примерно вдвое больше по величине, чем те же коэффициенты, полученные при тех же режимах плавания для дельфина, движитель которого производит тягу изгибно-колебательными движениями всего тела. Чем больше режим ускорения и чем больше напряжение тела, тем меньше его сопротивление. В этом случае включаются в работу все системы организма. При этом сопротивление дельфина становится существенно меньшим, чем в случае обтекания жесткой пластины турбулентным пограничным слоем. На рис. 8 приведены аналогичные зависимости дельфина и его модели.

В [46, 52, 53] приведены результаты экспериментальных исследований на аналогах кожных покровов дельфина. Исследованы различные типы конструкций эластичных пластин и продольно обтекаемых цилиндров. В зависимости от конструкции пластин и их механических характеристик

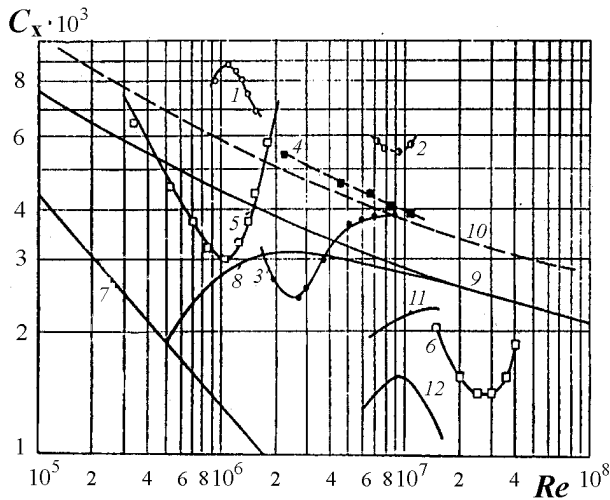


Рис. 8. Зависимость коэффициента сопротивления дельфина и его моделей от числа Рейнольдса: 1 – сопротивление дельфина, вычисленное по теории машущего движителя; 2 – сопротивление дельфина при активном торможении; 3 – сопротивление дельфина длиной 2,2 м при движении по инерции; 4 – расчет на ЭВМ сопротивление эквивалентного жесткого тела; 5 – сопротивление мертвой морской свиньи при буксировке в опытовом бассейне (размер дельфина $1 \times 0,21 \times 0,25$ м); 6 – сопротивление модели дельфина с профилем тела вращения НАСА-66; 7 – ламинарное, 8 – переходное, 9 – турбулентное обтекание жесткой пластины; 10 – сопротивление твердого тела вращения при турбулентном режиме обтекания; 11, 12 – опыты М. Крамера [*]

максимумы кривых сопротивления располагались при различных числах Рейнольдса. Максимальный эффект снижения сопротивления варьировался в пределах $20 \div 40\%$, а при определенных условиях эффект был сопоставим с полученным при инъекции в пограничный слой растворов полимеров.

На рис. 9 приведены примеры разработанных конструкций эластичных пластин, моделирующих кожные покровы дельфина [56-59]. Аналогичным образом выполнено моделирование плавниковых движителей и затем разработаны различные варианты конструкций их аналогов [60-64 и др.]. Разработано также семейство малых подводных аппаратов, моделирующих различные виды гидробионтов [65-67 и др.]. На основе полученных фундаментальных результатов гидробионических исследований созданы конструкции и технологии для использования в различных областях техники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты гидробионических исследований на примере китообразных с учетом основных гидробионических принципов позволя-

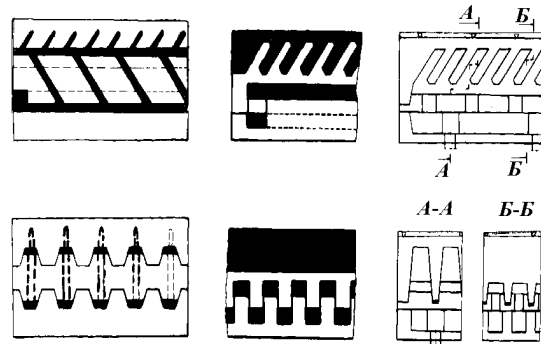


Рис. 9. Примеры разработанных конструкций эластичных пластин, моделирующих кожные покровы дельфина [7]

ют утверждать, что у быстро плавающих морских животных существует комплекс приспособлений для снижения гидродинамического сопротивления. Обнаружен ряд средств адаптации, которые:

- функционируют отдельно и / или одновременно в зависимости от режима плавания,
- взаимодействуют в направлении достижения максимальных результатов, в частности, для увеличения эффективности КПД движителя и снижения сопротивления,
- воздействуют в качестве активного управления с системой обратной связи,
- были смоделированы и испытаны в различной степени приближения к натурным условиям.

В природе все приспособления функционируют взаимосвязано. Однако для технических приложений можно выполнять оптимизацию отдельных систем. По аналогичной схеме были подробно рассмотрены также особенности формы тела и плавников, двигательного-двигательного комплекса, системы подачи полимеров у быстро плавающих рыб, особенности кинематики движения, закономерности нестационарного движения и колебания тела, особенности резонансных механизмов и др.

1. Соколов В. Е. Структура кожного покрова некоторых китообразных. – Бюлл. Моск. общ. испытателей природы. Отд. биологии: 1955, Т 6. – 45-60 с.
2. Соколов В. Е. Морфология и экология морских млекопитающих. – М.: Наука, 1987. – 453 с.
3. Соколов В. Е. Кожный покров млекопитающих. – М.: Наука, 1973. – 487 с.
4. Томилини А. Г. Китообразные. Звери СССР и прилегающих стран. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – 756 с.

5. *Bainbridge R. B.* The speed of swimming of fish as related to size and to the frequency and amplitude of tail beat // *J. Exp. Biol.*– 1958.– V 5.– P. N 1.17–33
6. *Sickmann J. B.* Investigation into the movement of swimming animals // *ZWDI.*– 1962.– V 104.– P. N 10.433–439
7. *Gray J.* *Animal Locomotion.*– L.: Weidenfeld and Nicholson, 1961.– 479 p.
8. *Hertel H.* *Structure, Form and Movement (Biology and Technology).*– B.: Reinhold Publishing Corp., 1966.– 251 p.
9. *Козлов Л. Ф.* Теоретическая биогидродинамика.– Киев: Вища шк., 1983.– 240
10. *Логвинович Г. В.* Гидродинамика тонкого гибкого тела // *Бионика.*– 1970.– 4.– С. 3–5.
11. *Романенко Е. В.* Теория плавания рыб и дельфинов.– М.: Наука, 1986.– 152 с.
12. *Lighthill J.* *Mathematical biofluid dynamics.*– SIAM: Philadelphia Pa, 1983.– 281 p.
13. *Wu T. Y.* *Hydromechanics of swimming of fishes and cetaceans.*– N-Y., L.: Adv. Appl. Mech., 11, 1971.– 1-63 p.
14. *Lang T. G.* Hydrodynamic analysis of dolphin fin profiles // *Nature.*– 1971.– V 104.– P. N 9. c.1110–1111
15. *Swimming and Flying in Nature*, v.1.– N-Y., L.: Plenum Press, 1975.– 421 p.
16. *Zerbst E. W.* *Bionik, biologische Funktionsprinzipien und ihre technischen Anwendungen.*– B.: V.G. Teubner-Studienbucher, 1987.– 231 p.
17. *Reiner R.* *Selbstorganisation : Anwendung eines biologischen Prinzips.*– B.: Biona-report, 1998.– N 8 p.13-25
18. *Nachtigall W.* *Bionik. Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler.*– Berlin: Springer - Verlag, 1998.– 331 p.
19. *Першин С. В., Шаров Я. Ф., Носов Е. П.* Гидробионт как адаптационная колебательная система // *Бионика.*– 1973.– 7.– С. 18–25.
20. *Першин С. В.* Самонастройка демпфирования кожи и снижение гидродинамического сопротивления при активном плавании китообразных // *Бионика.*– 1976.– 10.– С. 33–40.
21. *Першин С. В.* Основы гидробионики.– Л.: Судостроение, 1988.– 263 с.
22. *Бабенко В. В., Суркина Р. М.* Некоторые гидродинамические особенности плавания дельфинов // *Бионика.*– 1969.– 3.– С. 19–26.
23. *Бабенко В. В., Гнитецкий Н. А., Козлов Л. Ф.* Предварительные результаты исследования упругих свойств кожи живых дельфинов // *Бионика.*– 1969.– 3.– С. 12–19.
24. *Бабенко В. В.* К методике экспериментальных исследований по гидробионике // *Бионика.*– 1981.– 15.– С. 88–98.
25. *Бабенко В. В.* Некоторые особенности терморегуляции наружных покровов водных животных // *Бионика.*– 1983.– 17.– С. 35–39.
26. *Бабенко В. В.* О взаимодействии гидробионтов с потоком // *Бионика.*– 1992.– 25.– С. 1–11.
27. *Vabenko V. V.* *Hydrobionics principles of drag reduction* // *Kiev, Ukraine.*– AGARD FDP Workshop on "High Speed Body Motion in Water", 1998.– P. 3(1-14).
28. *Шпет Н. Г.* Особенности формы туловища и хвостового плавника китов // *Бионика.*– 1975.– 9.– С. 36–41.
29. *Семенов Н. П., Бабенко В. В., Каян В. П.* Экспериментальное исследование некоторых особенностей гидродинамики плавания дельфинов // *Бионика.*– 1974.– 8.– С. 23–31.
30. *Яремчук А. А., Бабенко В. В.* К вопросу о сопоставлении биоэнергетики человека и дельфина // *Бионика.*– 1998.– 27-28.– С. 152–154.
31. *Каян В. П.* О гидродинамических характеристиках плавникового движителя дельфина // *Бионика.*– 1979.– 13.– С. 9–15.
32. *Козлов Л. Ф., Шакало В. М.* О режиме течения в квазистационарном пограничном слое некоторых китообразных // *Бионика.*– 1980.– 14.– С. 74–81.
33. *Козлов Л. Ф., Шакало В. М., Бурьянова Л. Д.* О влиянии нестационарности на режим течения в пограничном слое черноморской афалины // *Бионика.*– 1974.– 8.– С. 13–16.
34. *Пятецкий В. Е., Шакало В. М., Цыганюк А. И.* Исследование режима обтекания водных животных // *Бионика.*– 1982.– 16.– С. 31–36.
35. *Суркина Р. М.* О строении и функции кожной мускулатуры дельфинов // *Бионика.*– 1971.– 5.– С. 81–87.
36. *Суркина Р. М.* Расположение дермальных валиков на теле дельфина белобочки // *Бионика.*– 1971.– 5.– С. 87–94.
37. *Бабенко В. В., Суркина Р. М.* Определение параметра колеблющейся массы кожных покровов некоторых морских животных // *Бионика.*– 1971.– 5.– С. 94–98.
38. *Яблоков А. В., Белькович В. М., Борисов В. И.* Киты и дельфины.– М.: Наука, 1972.– 472 с.
39. *Агарков Г. Б., Хоменко Б. Г., Хаджинский В. Г.* Морфология дельфинов.– Киев: Наук. думка, 1970.– 167 с.
40. *Parry D. A.* The Structure of Whale Blubber and Discussion of its Thermal Properties // *Quart. J. Microsc. Sc.*– 1949.– V 90.– P. N 1.273–279
41. *Бабенко В. В., Никишова О. Д.* Некоторые гидродинамические закономерности строения кожных покровов морских животных // *Бионика.*– 1976.– 10.– С. 27–33.
42. *Бабенко В. В., Козлов Л. Ф., Першин С. В.* Самонастройка демпфирования кожи китообразных при активном плавании // *Бионика.*– 1982.– 16.– С. 3–10.
43. *Бабенко В. В.* Основные характеристики гибких покрытий и критерии подобия // *Бионика.*– 1971.– 5.– С. 73–75.
44. *Агарков Г. Б., Бабенко В. В., Ференц З. И.* Об иннервации кожи и кожной мускулатуры дельфина в связи с гипотезой стабилизации течения в пограничном слое // *Проблемы бионики.*– М:Наука, 1973.– P. 478–483.
45. *Бабенко В. В.* Исследование упругости кожи живых дельфинов // *Бионика.*– 1979.– 13.– С. 43–51.
46. *Бабенко В. В., Канарский М. В., Коробов В. И.* Пограничный слой на эластичных пластинах.– Киев: Наук. думка, 1993.– 263 с.
47. *Бабенко В. В., Юрченко Н. Ф.* О моделировании гидродинамических функций наружных покровов водных животных // *Гидродинамические вопросы бионики.*– Киев: Наук. думка, 1983.– P. 37–46.

48. Кидун С. М. Исследование скорости распространения колебаний на покрове дельфина // Бионика.– 1979.– 13.– С. 52–58.
49. Babenko V. V., Jaremchuk A. A. On biological foundations of dolphin's control of hydrodynamic drag reduction // Newport, Rhode Island.– Proc. Inter. Symp. on Seawater Drag Red., 1998.– P. 451-452.
50. Babenko V. V. Polymers submission optimization with the help of sword-shaped tips // Berlin.– Proc. 10th European drag reduction working meeting, 1997.– P. 19-21.
51. Babenko V. V. Hydrobionics principles of drag reduction // Newport, Rhode Island.– Proc. Inter. Symp. on Seawater Drag Red., 1998.– P. 453-455.
52. Козлов Л. Ф., Бабенко В. В. Экспериментальные исследования пограничного слоя.– Киев: Наук. думка, 1978.– 184 с.
53. Козлов Л. Ф., Цыганюк А. И., Бабенко В. В. и др. Формирование турбулентности в сдвиговых течениях.– Киев: Наук. думка, 1985.– 283 с.
54. Каян В. П. О коэффициенте сопротивления дельфина // Бионика.– 1974.– 10.– С. 31–35.
55. Kramer M. O. Boundary layer stabilisation by distributed dumping // ASME J.– 1960.– V. 72, N 2.– P. 25–35.
56. Бабенко В. В., Козлов Л. Ф., Першин С. В. Демпфирующее покрытие // Авт. свид., МКИ F15d 1/12.– 1974.– N 413286.– Оpubл. 30.01.74, Бюл. 33.
57. Бабенко В. В., Козлов Л. Ф., Коробов В. И. Демпфирующее покрытие // Авт. свид., МКИ F15d 1/12.– 1975.– N 483538.– Оpubл. 05.09.75, Бюл. 33.
58. Бабенко В. В., Коробов В. И., Козлов Л. Ф. Регулируемое демпфирующее покрытие // Авт. свид., МКИ F15d 1/12.– 1978.– N 597866.– Оpubл. 15.03.78, Бюл. 10.
59. Бабенко В. В. Демпфирующее покрытие // Авт. свид., МКИ F15d 1/12.– 1981.– N 802672.– Оpubл. 07.02.81, Бюл. 5.
60. Бабенко В. В., Козлов Л. Ф., Каян В. П. Машущий плавниковый движитель // Авт. свид., МКИ В63 Н 1/36.– 1975.– N 484129.– Оpubл. 15.09.75, Бюл. 34.
61. Бабенко В. В. Плавниковый движитель // Авт. свид., МКИ В63 Н 1/36.– 1976.– N 529104.– Оpubл. 25.09.76, Бюл. 35.
62. Тарасенко В. Ф., Бабенко В. В. Плавниковый движитель для лодок // Авт. свид., МКИ В63 Н 1/36.– 1981.– N 796074.– Оpubл. 15.01.81, Бюл. 2.
63. Коробов В. И., Бабенко В. В., Белинский В. Г. Плавниковый движитель // Авт. свид., МКИ В63 Н 1/36.– 1991.– N 1671515.– Оpubл. 23.08.91, Бюл. 31.
64. Полищук С. В., Бабенко В. В. Плавниковый движитель // Патент Рос. фед., МКИ В63 Н 1/36.– 1995.– N 2033938.– Оpubл. 30.04.95, Бюл. 12.
65. Полищук С. В., Бабенко В. В. Аппарат с плавниковым движителем // Патент Украины, МКИ В63 Н 1/36.– 1995.– N 95073406.– Оpubл. 20.07.95, Бюл. 7.
66. Полищук С. В., Бабенко В. В. Аппарат с плавниковым движителем // Патент Украины, МКИ В63 Н 1/36.– 1996.– N 96020765.– Оpubл. 28.02.96, Бюл. 2.
67. Babenko V. V., Moros V. V., Martynenko I. I. and ase. Experiens of creation of underwater remotely operated vehicles in Ukraine and perspective of their application in geological oceanography // Mineral resources of Ukraine.– 2000.– N 1.– P. 21–25.